УДК 631.303

**В.И. ЗУБКОВ**

# АЛГОРИТМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КЛАВИШНОГО СОЛОМОТРЯСА

*Разработан алгоритм технологического процесса клавишного соломотряса, в котором математические операторы, относящиеся к теории виброперемещения, теории упруговязкого поведения соломы и теории сепарации базируются на параметрах свойств частиц вороха и режимов внешнего воздействия. Алгоритм представлен в табличной форме без обоснования и вывода используемых формул со ссылками на источники, в которых даны обоснования этих формул. Приведены результаты численных экспериментов для сухого вороха озимой пшеницы в виде соответствующих графиков.*

***Ключевые слова:*** *алгоритм, соломотряс, грубый ворох, сепарация, вибрационное перемещение, динамическая осадка, самопросыпание, динамическое сжатие, упругое расширение, ядро распределения зерен, центр масс порции вороха, среда вороха, окружающая среда.*

**Введение.** Современная теория двухвального клавишного соломотряса, наиболее полно представленная в учебнике М.Н.Летошнева [1] более 50 лет назад, не учитывает влияние свойств соломы на виброперемещение слоя и сепарацию зерен, несмотря на то, что он (Летошнев) первым опубликовал статью об упругом соударении соломы с клавишами и под его руководством С.М.Григорьев провел первые наблюдения и фотосъемку упругого поведения соломы.

Солома - это особый физический объект: среда, совокупные свойства которой связаны с индивидуальными свойствами дискретных частиц. Выявлены отличительные свойства дискретной среды в сравнении с материальной точкой или упругим телом, состоящие в том, что она адаптируется к режимам внешних гармонических воздействий. Плотный слой разрыхляется, а рыхлый - уплотняется до таких значений плотности в начале и конце удара, при которых длительность одного цикла делится точно на длительность упругого удара и длительность упругого расширения. Установлено, что для каждого вида вороха и величины амплитуды существует такой частотный режим, при котором достигается наибольшая деформация слоя, и это связано с существованием оптимальных значений амплитуды и частоты вращения коленчатого вала, выявленных ранее эмпирическим путем, но не имевших объяснения и обоснования до настоящего времени.

Если рассматривать алгоритм технологического процесса соломотряса как взаимообусловленную связь трех теорий: теории соломы, теории виброперемещения и теории сепарации, то теорию Летошнева можно классифицировать как теорию виброперемещения материальной точки, не наделенной свойствами слоя соломы и влиянием окружающей среды.

Взаимодействие потока соломы на соломотрясе с окружающей средой характеризуется тем, что сопротивление среды потоку в направлении, перпендикулярном поверхности соломотряса, на порядок выше сопротивления вдоль его поверхности. Это создает особые условия движению соломы, и результаты наших расчетов скорости потока совпадают с данны-

ми экспериментов, которые почти вдвое превышают результаты расчетов по Летошневу.

Нами сделана попатка увязать свойства материала (соломы) со свойствами составляющих ее частиц. В исследовании ставилась следующая задача: разработать методику численных экспериментов процесса сепарации на основе физико-механических свойств грубого вороха и режима внешнего воздействия.

При разработке теории сепарации были учтены побуждающие факторы, такие как разность потенциальных сил, действующих на зерно и солому в момент свободного полета слоя (самопросыпание), и разность кинетической энергии соломы и зерен в момент удара (динамическая осадка).

**Формирование алгоритма**. Рассмотрим фазовую развертку одного цикла установившегося процесса работы клавишного соломотряса (рис.1), где можно увидеть длительность цикла TX, длительность удара T1 и длительность упругого расширения в свободном полете T2. На отрезке времени T1 преобладает фактор динамической осадки, на отрезке времени T2 - фактор самопросыпания. Такое понимание технологического процесса клавишного соломотряса общеизвестно, но полная математическая интерпретация во взаимной связи выявленных факторов получена нами впервые.

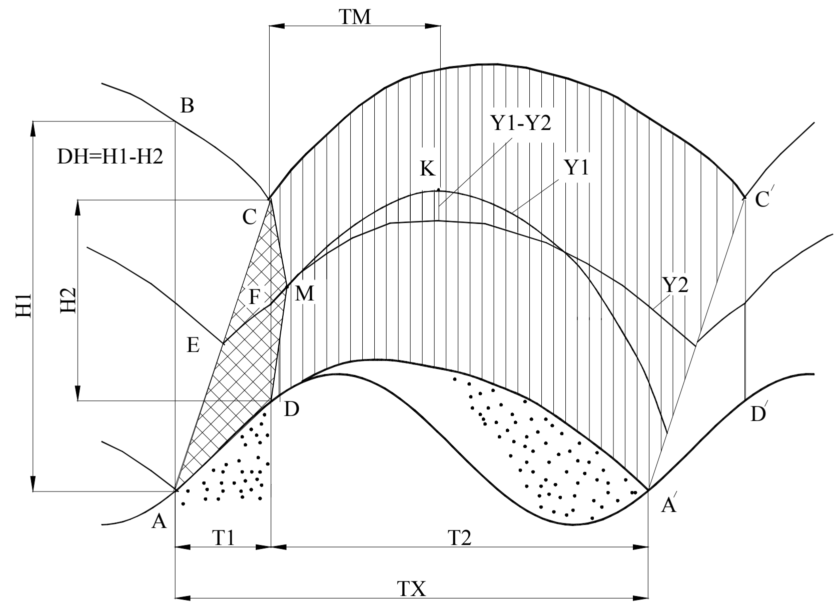



Рис.1. Схема фазовой развертки явлений рабочего процесса клавишного соломотряса по времени одного цикла TX

В рамках журнальной статьи невозможно подробно и во взаимной связи изложить наши разработки по каждой из трех теорий, входящих в алгоритм технологического процесса соломотряса, поэтому представляем его в структурной (рис.2) и табличной (см. табл.3) форме с объяснением назначения каждой формулы и входящих в нее параметров.

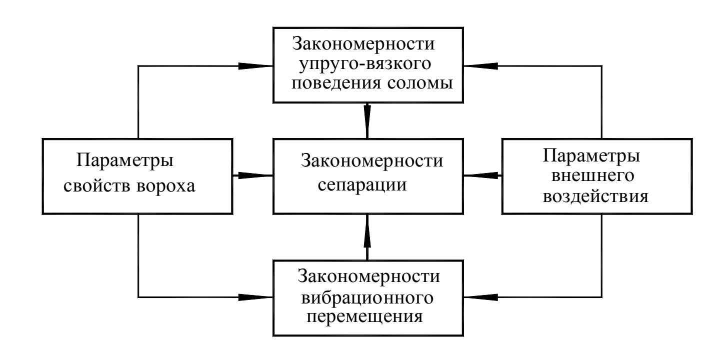



Рис.2. Структурная схема алгоритма
технологического процесса клавишного соломотряса

На основе исходных параметров, представленных в табл. 1 как аргументы свойств соломы и в табл.2 как параметры внешнего воздействия, формируются математические выражения для расчета текущих и выходных параметров технологического процесса соломотряса. Математические выражения, используемые в предлагаемом алгоритме, могут иметь различную природу: теоретическую, эмпирическую, численную или логическую. Если смысл теоретических и эмпирических выражений понятен, то смысл численных и логических следует пояснить, так как такой подход используется, возможно, впервые.

Таблица 1

Аргументы свойств грубого вороха
(в скобках указаны числовые значения для численных экспериментов)

| |
|---|
| $l$ – усредненная длина соломин, *м* (0,25);<br>$d$ – усредненный диаметр соломин, *м* (0,003);<br>$C_i$ – жесткость соломины, *н/м²* (0,0006);<br>$\rho_n$ – плотность соломины, *кг/м³* (30);<br>$\varphi$ – угол трения между соломинами, *рад.* (0,8);<br>$\varphi_1$ – угол трения зерна о соломину, *рад.*(0,7) |

Таблица 2

Аргументы внешнего воздействия
(в скобках указаны числовые значения для численных экспериментов)

| |
|---|
| $x$ - длина соломотряса, *м* (4);<br>$R$- радиус кривошипа коленчатого вала, *м* (0,005);<br>$\omega$ - угловая частота вращения коленчатого вала, *1/с* (15… 30);<br>$\alpha$ - угол наклона поверхности соломотряса, *рад* (0…15);<br>$\eta_R$ - живое сечение решетки поверхности соломотряса, (0,7);<br>$Q$ –удельная подача соломистого вороха на 1 метр ширины соломотряса, *кг/(с· м.)* (5).<br><br>*Постоянные величины внешнего воздействия:*<br>g=9,8 - ускорение свободного падения, *м/с²*;<br>$\lambda=9$ - коэффициент сопротивления окружающей среды, *1/с;*<br>$\alpha$*= 0,8 - предельный угол наклона поверхности соломотряса, *рад.* |

Численные выражения (строки 8, 9, 10 и 19 в табл.3) получены методом подбора уравнения по совокупности дискретных точек, полученных

на основе теоретического расчета, и используются для сокращения вычислительных операций при многократной прогонке алгоритма в ограниченных интервалах.

Таблица 3

Алгоритм технологического процесса клавишного соломотряса

| № п/п | Формула | Описание параметров |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | $h_0 = \sqrt[3]{l \cdot d^2}$ | Геометрический модуль вороха, *м* |
| 2 | $\rho_0 = \rho_n \dfrac{d^2}{h_0^2}$ | Плотность соломы на границе разрозненных частиц и среды, *кг/м³* |
| 3 | $\rho_e = \dfrac{\rho_0 \cdot \rho_n}{\rho_n - (\rho_n - \rho_0)Cos\varphi}$ | Плотность соломы на границе неупругого и упругого состояния , *кг/м³* |
| 4 | $C = \dfrac{48 \cdot C_1}{l^4}$ | Жесткость усредненной соломины, *кг/м²* . |
| 5 | ТХ, $t_x = \dfrac{2 \cdot \pi}{\omega}$ | Длительность цикла, *с* |
| 6 | $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{f^2 \cdot \lambda^2}{4} + \dfrac{f \cdot g}{R}} - \dfrac{f \cdot \lambda}{R}$ | Угловая частота кривошипа коленчатого вала для режима скольжения вперед, *1/с* |
| 7 | $\omega_2 = \sqrt{\dfrac{g}{R}}$ | Угловая частота отрыва центра масс элементарного столба в верхнем положении клавиши, *1/с* |
| 8 | $\omega_1 = \omega_2 - 0{,}2\lambda$ (аппроксимация) | Угловая частота начала отрывного движения слоя соломы, *1/с* |
| 9 | $\omega_3 = 2{,}14\omega_2$ (аппроксимация) | Угловая частота начала режима непрерывного подбрасывания, *1/с* |
| 10 | $t_3 = t_x \cdot \sqrt[3]{\dfrac{\omega - \omega_1}{\omega_3 - \omega_1}}$ (аппроксимация) | Длительность свободного полета центра масс выделенного столба соломы, *с* |
| 11 | $A = \arctan \dfrac{\omega}{\lambda}$ | Промежуточный коэффициент |
| 12 | $\gamma = \pi - \arccos\left[\dfrac{g}{\lambda \omega R} - \cos A\right] - A$ | Угол отрыва центра масс выделенного столба соломы, *рад.* |
| 13 | $Vo = \omega R Cos\gamma$ | Нормальная составляющая скорости поверхности клавиши, *м/с* |
| 14 | $V_y = \dfrac{2\omega R}{3} + \dfrac{g}{\lambda} - (\dfrac{g}{\lambda} + V_0) \cdot e^{-\lambda \cdot t_3}$ | Скорость соударения поверхности клавиши и слоя соломы, отнесенная к центру масс выделенного столба соломы, *м/с* |
| 15 | $\gamma_1 = \pi - B - \arccos \dfrac{g \cdot \cos B}{\lambda \cdot W \cdot R}$ | Промежуточный коэффициент |
| 16 | $B = \arctan \dfrac{W}{\lambda}$ | Промежуточный коэффициент |

Продолжение табл.3

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| 17 | $W = \frac{\omega_2 + \omega_3}{2}$ | Промежуточный коэффициент |
| 18 | $A_v = \frac{t_3 \cdot W \cdot R \cdot \sin\gamma_1}{t_x \cdot \ln\frac{W}{\omega_0}}$ | Промежуточный коэффициент |
| 19 | $V_x = A_v \cdot \ln\frac{\omega}{\omega_0}\left(1 - \frac{\alpha}{\alpha^*}\right)$ (аппроксимация) | Скорость виброперемещения потока соломы на соломотрясе, *м/с* |
| 20 | $q = \frac{Q}{Vx}$ | Нагрузка соломы на единицу площади поверхности соломотряса, *кг/м²* |
| 21 | $n = \frac{q}{d \cdot \rho_n}$ | Число условных элементарных слоев соломин по высоте слоя, *шт.* |
| 22 | $H_2 = \frac{q}{\rho_n}\left[1 + \frac{\rho_n - \rho_\varepsilon}{\rho_\varepsilon} \cdot \frac{2C}{2C + q}\right]$ | Высота слоя соломы в конце соударения с поверхностью клавиши, *м* |
| 23 | $H_\varepsilon = \frac{q}{\rho_\varepsilon}$ | Высота слоя соломы равновесного состояния, *м* |
| 24 | $\begin{cases} T1 = \frac{\Delta H}{V_y}; \\ T2 = \frac{\Delta H}{u}; \\ TX = T1 + T2 \end{cases}$ | Система уравнений для определения длительности удара *T1*, длительности упругого расширения *T2* и величины деформации слоя соломы ΔН для данного значения длительности цикла *TX* |
| 25 | $H_1 = H_2 + \Delta H$ | Высота слоя соломы в начале удара, *м* |
| 26 | $\rho_1 = \frac{q}{H_1}$ | Плотность соломы в начале удара, *кг/м³* |
| 27 | $E = C\frac{(\rho_n - \rho_\varepsilon)^2 \cdot \rho^2}{(\rho_n - \rho)^2 \cdot \rho_\varepsilon}$ | Модуль упругости соломы в начале удара, *кг/м²* |
| 28 | $u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | Скорость упругой волны по высоте слоя соломы в момент начала удара, *м/с* |
| 29 | $\upsilon = \frac{1}{H_\varepsilon}\sqrt{\frac{E_\varepsilon}{\rho_\varepsilon}}$ | Собственная частота данного состава соломы, *1/с* |
| 30 | $\eta_э = Cos\varphi_1$ | Вероятность сепарации единичного зерна через элементарный слой соломин |

| | | |
|---|---|---|
| 31 | $h_2 = \frac{H_2}{n}$ | Расстояние между элементарными слоями соломы по высоте слоя для $H_2$ в конце удара, *м* |

Окончание табл.3

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| 32 | $h_S = \dfrac{H_1 + H_2}{2n}$ | Усредненное значение расстояния между элементарными слоями соломин в момент свободного полета, *м* |
| 33 | $TM = \dfrac{V_0}{g}$ | Время набора наибольшей высоты полета брошенных вверх зерен, *с* |
| 34 | $as=g(1-e^{\lambda(T2-TM)})$ | Относительное ускорение зерен внутри решетки соломы в свободном полете, *м/с* |
| 35 | $V_1 = \eta_Э \sqrt{\dfrac{as \cdot h_2}{2}}$ | Относительная скорость зерен внутри решетки соломы в момент удара, *м/с* |
| 36 | $V_2 = \eta_Э \sqrt{\dfrac{as \cdot hs}{2}}$ | Относительная скорость зерен внутри решетки соломы в момент свободного полета, *м/с²* |
| 37 | $Y1 = V_0 \cdot TM - \dfrac{g \cdot (TM)^2}{2}$ | Наибольшая высота полета зерен, *м* |
| 38 | $Y2 = \dfrac{g + \lambda V_0}{\lambda^2}(1 - e^{-\lambda \cdot TM}) - \dfrac{g \cdot TM}{\lambda}$ | Наибольшая высота полета центра масс выделенного столба соломы, *м* |
| 39 | $VM = \eta_Э \dfrac{Y1 - Y2}{2TM}$ | Относительная скорость зерен при выбросе на поверхность слоя соломы, *м/с* |
| 40 | $\eta_{SM} = \dfrac{VM \cdot TM}{HS + VM \cdot TM}$ | Вероятность выброса зерен на поверхность слоя соломы |
| 41 | $\eta_{S2} = \dfrac{V_2 \cdot (T2 - TM)}{HS + V_2 \cdot (T2 - TM)}$ | Вероятность самопросыпания зерен в свободном полете слоя соломы |
| 42 | $\eta_{S1} = \dfrac{V_1 \cdot t_1}{H_2 + V_1 \cdot t_1}$ | Вероятность самопросыпания зерен в момент удара |
| 43 | $\eta_д = \dfrac{\eta_Э^{nд} - 1}{n \cdot \ln \eta_Э}$ | Вероятность динамической осадки зерен в момент соударения слоя соломы с поверхностью клавиши |
| 44 | $\eta_1=\eta_д+\eta_{S1}-\eta_д \cdot \eta_{S1}$ | Сложение вероятностей |
| 45 | $\eta_2=\eta_{S2} - \eta_{SM} + \eta_{SM} \cdot \eta_{S2}$ | |
| 46 | $\eta_S=\eta_1+\eta_2 - \eta_1 \cdot \eta_2$ | |
| 47 | $\eta_R = \eta_{R1} - (\eta_{R1} - \eta_{R3})\dfrac{\omega - \omega_1}{\omega_3}$ Гипотеза | Вероятность сепарации зерен через решетку поверхности соломотряса |
| 48 | $\eta = \eta_S \cdot \eta_R$ | Полная вероятность |
| 49 | $k = \dfrac{\ln(1 - \eta)}{V_x \cdot t_x}$ | Коэффициент сепарации |
| 50 | $Y = e^{-kx}$ | Уравнение сепарации |

Логические выражения (строка 47 в табл. 3) используются для сближения расчетных и экспериментальных данных на основе предположений о возможной закономерности влияния какого-либо фактора при отсутствии теоретических или эмпирических данных. Здесь также осуществляет-

ся подбор уравнения, но не по точкам, а по факту сближения расчетных и экспериментальных данных.

Следует отметить, что представленный алгоритм предназначен не столько для расчета соломотряса, сколько для анализа влияния факторов и выявления на этой основе возможностей его совершенствования.

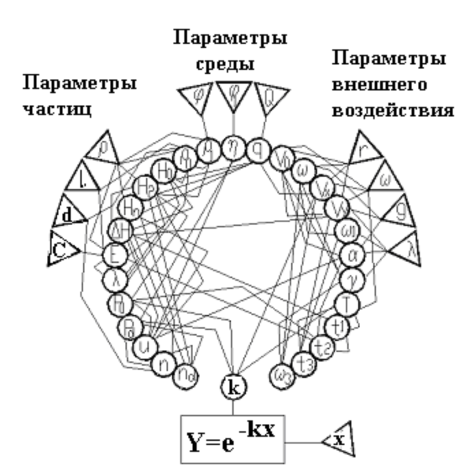



Рис.3. Графическое представление связи параметров технологического процесса работы клавишного соломотряса

На рис.3 показана схема взаимосвязи аргументов (в треугольниках по внешнему контуру) с текущими параметрами (в кружочках) и выхода их на уравнение сепарации (в прямоугольнике).

В табл. 3 записаны формулы для определения текущих параметров с объяснением их смысла. Для более подробного ознакомления следует обратиться к публикациям [2, 3, 4 и 5].

Если запуск алгоритма на исполнение осуществляется с решения уравнения первой строки данной таблицы, то его составление начинается с последней путем последовательного раскрытия содержания каждого параметра, входящего в уравнение.

**Численные эксперименты.** На основе алгоритма, представленного в табл.3, были проведены численные эксперименты подстановкой различных числовых значений параметров. Некоторые результаты этих экспериментов показаны на рис.4 и 5 для вороха озимой пшеницы с числовыми значениями параметров вороха из табл.1 и числовыми значениями аргументов внешнего воздействия из табл.2. Невытряс в соломе (Y%) отнесен к зерну, поступившему на соломотряс, поэтому он в численных экспериментах на порядок выше реальных потерь.

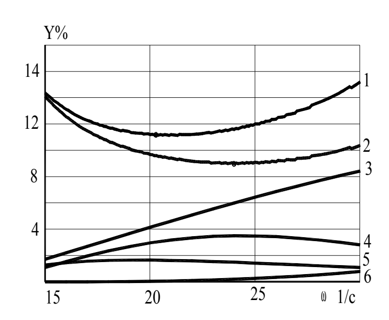



Рис.4. Графики потерь и вероятностей сепарации относительно зерна, поступающего на соломотряс: 1-потери с учетом сепарации через решетку; 2- потери без учета сепарации через решетку; 3- вероятность динамической осадки в одном цикле; 4 – вероятность самопросыпания в свободном полете; 5 – вероятность самопросыпания при соударении; 6 – вероятность выброса зерен

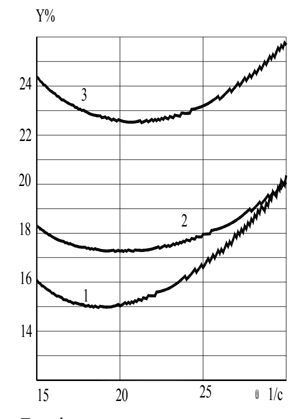



Рис.5. Графики потерь зерна для различных культур: 1– пшеница сухая; 2 – пшеница влажная; 3 – ячмень сухой

Графики 1 и 2 потерь зерна в соломе на рис.4 описаны экспонентой 50 из табл.3 и отображают известную из практики закономерность потерь зерна от частоты вращения коленчатого вала. Следует заметить, что никогда прежде для этих закономерностей не использовалась экспонента. Дело в том, что в представленном алгоритме коэффициент сепарации может принимать переменные значения, поэтому график, построенный на основе экспоненты, не похож на привычный. Графики 3-6 на рис.4 построены по формулам 40-43 из табл.3.

**Вывод.** Разработанный алгоритм позволяет глубже понять физическую сущность технологического процесса клавишного соломотряса на уровне параметров свойств соломы и режимов внешнего воздействия и может быть основой для уточнения режимов и конструктивных параметров соломотряса.

**Библиографический список**

1. *Летошнев М.Н.* Сельскохозяйственные машины / М. Н. Летошнев. - М.-Л., 1955. - 764 с.
2. *Зубков В.И.* Моделирование среды дискретных частиц / В.И.Зубков // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Серия Техн. науки.-2001.-№3. – С.59-63.
3. *Зубков В.И.* Упруговязкое поведение среды дискретных частиц / В.И.Зубков // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Серия Техн. науки.-2001.- №3. - С.64-68.
4. *Зубков В.И.* Виброперемещение упругих потоков / В.И.Зубков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. -2001.- №1. - С.33-36.
5. *Зубков В.И.* Моделирование поведения упругой среды в циклических процессах /В.И.Зубков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2002.- №3. - С.36-38.

Материал поступил в редакцию 26.11.08.

**V.I.ZUBKOV**

## ALGORITME TEHNOLOGICAL PROCESE KEYBOARD STRAW-SHAKER

The theory keyboard straw-shaker is considered{examined} in view of elastic - viscous behaviour of straw in interaction with a surface of a key. The theory straw-shaker is stated in the form of the description of algorithm of technological process of work keyboard straw-shaker without a substantiation and a conclusion of used formulas with references to sources in which substantiations of these formulas are given. Results of numerical experiments for dry and damp lots of a winter wheat and barley as corresponding schedules are resulted.

**ЗУБКОВ Виктор Иванович** (1935). Профессор кафедры «Графика и начертательная геометрия» Донского государственного технического университета. Кандидат технических наук (1968). Окончил РИСХМ (ныне ДГТУ) по специальности «Сельскохозяйственные машины» (1961).
Научные интересы связаны с исследованием процесса сепарации грубого вороха в схеме современного зерноуборочного комбайна и разработкой теории вороха на основе индивидуальных свойств дискретных частиц.

Имеет более 40 публикаций, в том числе монографии и учебные пособия, более 10 авторских свидетельств и патентов.
isavenkov@dstu.edu.ru